



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Antenna Solutions for MIMO Systems Using Parasitic Elements

Autor: Javier Dones Luengo
Tutor: Luis Enrique García Muñoz

Junio 2011

RESUMEN EN CASTELLANO

Introducción a los sistemas MIMO

En los últimos años, los sistemas MIMO han experimentado un gran desarrollo, hasta tal punto que el futuro de las comunicaciones Wireless pasa por el uso de esta tecnología. El rendimiento de estos sistemas en términos de capacidad de canal ha hecho que la velocidad de transmisión de los sistemas que utilizan MIMO se haya visto multiplicada.

Tradicionalmente, el multicamino suponía una degradación en las prestaciones de los sistemas radio, de tal modo que este efecto debía ser combatido en el receptor. El principio de funcionamiento de MIMO es el contrario, ya que trata de aprovecharse del multicamino, sacando beneficio de él en entornos altamente dispersivos. Para ello, estos sistemas utilizan el multiplexado espacial, transmitiendo múltiples señales desde diferentes antenas al mismo tiempo. En el lado del receptor, también se tienen un conjunto de múltiples antenas que reciben la superposición de todas las señales transmitidas. Dichas señales son combinadas para tratar de evitar desvanecimientos, lo que significará un aumento en la SNR y, por consiguiente, un aumento en la capacidad de canal. Por tanto, utilizando la diversidad espacial, conseguimos que cuando una o más de las múltiples señales recibidas en cada una de las antenas receptoras se encuentren en un desvanecimiento, al menos una del resto no lo esté.

Por otro lado, estudiando las ecuaciones que gobiernan los canales MIMO, se concluye que para ser capaces de determinar la señal transmitida, las señales recibidas deben ser lo más incorreladas posible. Idealmente, su coeficiente de correlación ha de ser 0, pero un diseño se considera válido si dicho parámetro tiene un valor inferior a 0.5.

Como se ha comentado, los sistemas MIMO incrementan enormemente la capacidad del canal de comunicaciones si el entorno es altamente dispersivo. Buscamos tener el mayor número de canales de comunicación paralelos independientes para aumentar de este modo la diversidad espacial. Esto hace que en un entorno multicamino ideal, para valores altos de SNR, la máxima capacidad teórica incremente su valor linealmente en un factor k , siendo k el número mínimo entre antenas transmisoras y receptoras.

Diseño de la Switched Parasitic Antenna (SPA)

Uno de los principales problemas de los sistemas MIMO es la necesidad de tener múltiples antenas transmisoras y receptoras con sus correspondientes cadenas de RF. Esto hace que el despliegue de la tecnología MIMO en dispositivos en los que el espacio es limitado (por ejemplo, teléfonos móviles) sea difícil debido a la gran dificultad a la hora de compactar e integrar dichas antenas y cadenas de RF. Por tanto, en los últimos años, distintas investigaciones se han llevado a cabo para tratar de solucionar esta limitación. Una de las soluciones más estudiadas es el empleo de antenas con elementos parásitos. Gracias a ello, se consigue orientar el haz hacia distintas posiciones del espacio para simular varias antenas, maximizando la capacidad de canal. Por tanto, la idea es tener uno o dos elementos activos con sus correspondientes cadenas de RF y un conjunto de elementos parásitos alrededor de ellos que controlan la dirección del haz. Los elementos parásitos estarán acabados con una carga activa que conmutará sus valores de impedancia para conseguir dicho efecto.

Mediante el empleo de elementos parásitos, podremos diseñar dos tipos de antenas:

- Rotating SPA. Esta antena hace un barrido de un conjunto M de posiciones del espacio (emulando el comportamiento de M antenas receptoras). La antena toma cada una de las N señales que le llegan en cada una de las M posiciones (siendo N el número de antenas transmisoras) para obtener la señal que se envió.
- Antena adaptativa. La idea de este tipo de antena consiste en implementar una estructura radiante con dos elementos activos y un conjunto de elementos parásitos alrededor que modifiquen las orientaciones de los haces. Para ello, será necesario la implementación en software de un algoritmo (tradicionalmente un algoritmo adaptativo) que sea capaz de modificar el valor de las cargas activas para direccionar el haz hacia aquellas direcciones del espacio que maximicen en cada instante la capacidad del canal.

Dependiendo de la antena en la que estemos interesados, las características del sistema pueden verse alteradas en mayor o menor medida, aunque se podrán llevar a cabo distintas acciones para tratar de combatirlas. Independientemente de ello, se ha demostrado, que el rendimiento del sistema tanto desde el punto de vista del diseño de antenas como desde el punto de vista de teoría de la comunicación es bastante bueno, consiguiéndose valores altos para la capacidad del canal.

Por otro lado, independientemente del tipo de antena que estemos implementando (rotating SPA o antena adaptativa), es absolutamente imprescindible que el tiempo en el que las cargas activas cambian de un valor a otro sea el menor posible, ya que buscamos tener altas tasas de transmisión para el sistema. Debido a esto, estos dispositivos (típicamente diodos varactores) suponen una de las limitaciones tecnológicas del proyecto y uno de los campos de investigación e innovación para esta tecnología.

Finalmente, el diseño de la SPA se ha llevado a cabo utilizando dos posibilidades distintas: monopolos y parches.

Caracterización matemática de la rotating SPA

Como hemos comentado, una de las dos aplicaciones que se estudian en este proyecto es el diseño de la rotating SPA. Este diseño necesita una caracterización matemática previa debido a sus implicaciones, tanto en el dominio de la frecuencia como en la SNR del sistema.

En el proyecto se demuestra que en el dominio del tiempo, llamando $r(t)$ a la señal recibida en el transceptor, podemos escribir que:

$$r(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{jl\omega_r t} \cdot \underbrace{\frac{\sin\left(\frac{l \cdot \pi}{M}\right)}{l \cdot \pi} \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_0\left(\phi_p - m \frac{2\pi}{M}\right) \cdot e^{-jl2\pi \frac{2m-1}{M}} \cdot s_p(t)}_{r_l(t)} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_l(t) \cdot e^{jl\omega_r t} \quad (1)$$

La ecuación (1) puede a su vez ser desarrollada en el dominio de la frecuencia para estudiarla más en detalle. Haciendo esto, y después de una serie de manipulaciones matemáticas, se llega a:

$$R(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{P-1} \underbrace{\frac{\sin\left(\frac{l \cdot \pi}{M}\right)}{l \cdot \pi} \sum_{m=0}^{M-1} g_0\left(\phi_p - m \frac{2\pi}{M}\right) \cdot e^{-jl2\pi \frac{2m-1}{M} T_r}}_{w_{l,p}} \cdot S_p(\omega - l\omega_r) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{P-1} w_{l,p} \cdot S_p(\omega - l\omega_r) \quad (2)$$

En la ecuación (2), $S_p(\omega)$ corresponde a la señal recibida desde la posición p (de las P posibles, ya que asumimos P dispersores). Por tanto, la señal que tenemos en el transceptor será un conjunto de infinitas réplicas en frecuencia de la señal original, cada una de las cuales multiplicadas por un peso $w_{l,p}$. Este hecho tiene una implicación fundamental, ya que este efecto se puede interpretar como el paso de una multiplexación espacial a una frecuencial, en la que las múltiples bandas que aparecen en frecuencia tienen un efecto análogo al de tener múltiples antenas en los sistemas MIMO tradicionales.

Por otro lado, como podemos observar en (2), tenemos un conjunto de infinitas réplicas en frecuencia. El peso que multiplica a cada una de estas réplicas tiene forma de sinc, por lo que las amplitudes de las réplicas irán decreciendo. Esto implica que, a efectos prácticos, sólo nos interesan las L primeras réplicas, ya que sería técnicamente imposible manejar infinitas réplicas espectrales. Dependiendo del número M de posiciones que se cubran por parte de la antena, tendremos que considerar más o menos réplicas. De este modo, se demuestra que, si tenemos cuatro posibles posiciones de la antena, bastará con considerar la componente fundamental y otros cuatro armónicos.

La conclusión fundamental del diseño de la rotating SPA es que su uso en un sistema de comunicaciones real queda limitado a su despliegue en el receptor, ya que, debido a la expansión en frecuencia, su uso en el transmisor implicaría invadir las bandas adyacentes.

Por su parte, el empleo de la rotating SPA hace que la SNR sufra una degradación, de tal modo que, si llamamos SNR_{conv} a la relación señal a ruido que tendríamos si utilizáramos una antena convencional, tendremos que el nuevo valor de la relación señal a ruido (SNR_{rot}) pasa a ser el que se muestra en (3).

$$SNR_{rot} = \frac{SNR_{conv}}{L + 1} \quad (3)$$

Finalmente, es necesario un estudio de qué ocurre cuando se muestrea la señal de la rotating SPA. La consecuencia fundamental es que, seleccionando una frecuencia de muestreo adecuada, las prestaciones del sistema no se verían prácticamente degradadas.

Diseño de la SPA utilizando monopolos

El primer diseño que se ha utilizado para implementar la SPA se ha basado en el empleo de monopolos.

Dicho diseño consiste en un monopolo sobre un plano de masa y un conjunto de parásitos alrededor que conmutan entre dos estados para direccionar el haz.

El análisis del monopolo desde el punto de vista de teoría de antenas se hace utilizando la Teoría de Imágenes. Haciendo uso de ella, se deduce que un monopolo de longitud $\lambda/4$ sobre un plano conductor infinito puede ser estudiado en el semiplano superior al conductor como un dipolo $\lambda/2$. De esta manera, llamando l a la longitud del monopolo, c a la velocidad de la luz en el vacío y f a la frecuencia de funcionamiento, podemos determinar la frecuencia de resonancia del mismo aplicando (4).

$$f = \frac{c}{4 \cdot l} \quad (4)$$

Después de diferentes pruebas, podemos comprobar qué parámetros de la antena afectan a las diferentes características de la misma. A partir de dichas pruebas, se constata que, tal y como se especifica en (4), la frecuencia de resonancia viene determinada por la longitud del monopolo. Además, la longitud del plano de masa tiene un gran impacto en el nivel de adaptación. Por otro lado, la Teoría de Imágenes asume que el plano conductor es infinito. Teniendo en cuenta que esta exigencia no es físicamente implementable, bastará con que dicho plano sea suficientemente grande en términos de longitudes de onda.

Una vez hecha la caracterización del monopolo aislado sobre el plano conductor, se pasa a estudiar el efecto de la inclusión de los elementos parásitos. Como esperábamos, dichos elementos logran modificar la orientación del haz. Dependiendo de su tamaño, tenemos dos posibles situaciones:

- Si la longitud del elemento parásito es menor que el monopolo, el máximo de radiación apunta hacia la dirección del elemento parásito. En este caso el elemento parásito recibe el nombre de director.
- Si la longitud del elemento parásito es mayor que el monopolo, el máximo de radiación apunta hacia la dirección contraria a la del elemento parásito. En este caso el elemento parásito recibe el nombre de reflector.

Finalmente Fig. 1 muestra el aspecto de la SPA empleando monopolos.

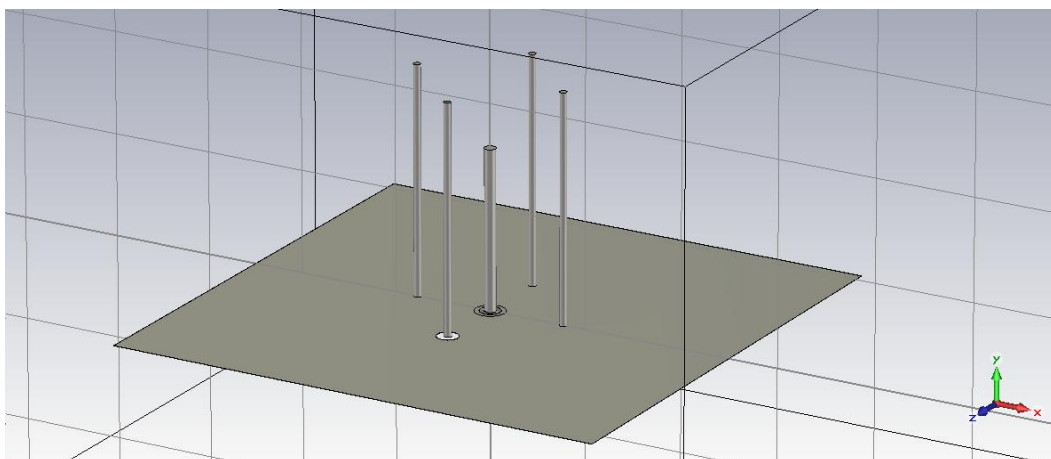


Fig. 1. SPA utilizando monopolos.

En la Tabla 1 se recogen los parámetros más importantes de la antena de la Fig. 1.

Directividad [dBi]	Eficiencia de radiación	Eficiencia de radiación [dB]	Eficiencia total	Eficiencia total [dB]	Ganancia [dB]
5.77	0.9828	-0.07513	0.9307	-0.3119	5.70

Tabla 1. Características de la SPA usando monopolos.

Por su parte, la Tabla 2 recoge las dimensiones de la antena.

Elemento	Dimensiones geométricas [mm]
Longitud del monopolo activo	31.50 ($\approx \lambda/4$)
Radio del monopolo activo	1.13
Longitud de los elementos parásitos	44.30
Radio de los elementos parásitos	0.70
Distancia monopolo-parásito	15.37 ($\approx \lambda/8$)
Grosor del plano de masa	0.035
Longitud del sustrato (eje x)	100 ($\approx 4\lambda/5$)
Longitud del sustrato (eje z)	100 ($\approx 4\lambda/5$)

Tabla 2. Dimensiones de los elementos de la SPA usando monopolos.

Como se aprecia en la Fig. 1, tenemos cuatro elementos parásitos, es decir, el haz podrá apuntar hacia cuatro direcciones posibles. Por tanto, es necesario calcular el coeficiente de correlación comparando cada una de ellas con las tres restantes. Como los haces son idénticos pero rotados 90° , basta con estudiar tres coeficientes de correlación. Dichos coeficientes tienen los valores 0.0477, 0.0995 y 0.0444. Estos resultados implican que la antena sería capaz de recuperar la información transmitida ya que todos ellos se encuentran ampliamente por debajo del límite impuesto de 0.5.

Aunque en este diseño se ha implementado una antena capaz de cubrir cuatro posiciones del espacio, se pueden diseñar otras que cubran un número distinto añadiendo más o menos elementos parásitos. El límite superior de elementos parásitos viene impuesto por el coeficiente de correlación que se consigue, el cual es mayor cuanto mayor sea el número de elementos parásitos. De este modo se ha demostrado que, teóricamente, no se podrían tener más de doce elementos parásitos en el sistema, ya que en ese caso la correlación de las señales recibidas sería muy alta.

En cuanto a los resultados para la capacidad de canal, en el caso de la rotating SPA son bastante altos, y lo mismo ocurre para la antena adaptativa, ya que los valores del coeficiente de correlación son extremadamente bajos.

Diseño de la SPA utilizando parches

El segundo tipo de tecnología que se ha estudiado son las antenas microstrip (antenas de parche). Dichas antenas presentan una serie de ventajas como su facilidad de integración y fabricación, su reducido coste y su versatilidad. Por el contrario, las antenas de parche presentan un ancho de banda estrecho, baja eficiencia de radiación y pobre pureza de polarización. Aún así, sus características hacen de ellas unas candidatas perfectas para ser utilizadas en la implementación de la SPA.

Las antenas de tipo parche pueden tener formas muy diversas, pero en este proyecto se ha optado por emplear un parche cuadrado. En este caso particular, llamando L a la longitud del parche, c a la velocidad de propagación de la luz en el vacío, f a la frecuencia de funcionamiento y ϵ_r a la permitividad relativa del dieléctrico, podemos dimensionar la antena utilizando (5).

$$L \simeq \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Como podemos comprobar en la ecuación (5), la longitud del parche está íntimamente relacionada con la frecuencia de funcionamiento.

En cuanto a la implementación de la SPA, en este caso la idea es ligeramente diferente. La idea pasa ahora por tener un elemento central y un conjunto de elementos alrededor unidos a éste por unas líneas microstrip y un diodo varactor que conmute entre una condición de alta impedancia y otra de baja. La diferencia radica en que, si bien cuando teníamos la SPA utilizando monopolos conseguíamos modificar el haz del elemento activo para distintas configuraciones de los mismos, en el caso de la SPA empleando parches, cada vez, uno de los elementos exteriores radiará y el resto de elementos harán el papel de parásitos, consiguiendo de este modo orientar el haz.

Por otro lado, si tenemos un array de parches, cuando se excite uno de los elementos, éste comenzará lógicamente a radiar, pero también lo hará el resto de elementos debido al acoplo por radiación. Es por ello, que el diseño de la SPA empleando parches requiere tener en cuenta este comportamiento.

En la Fig. 2 se muestra el diseño de la SPA utilizando parches.

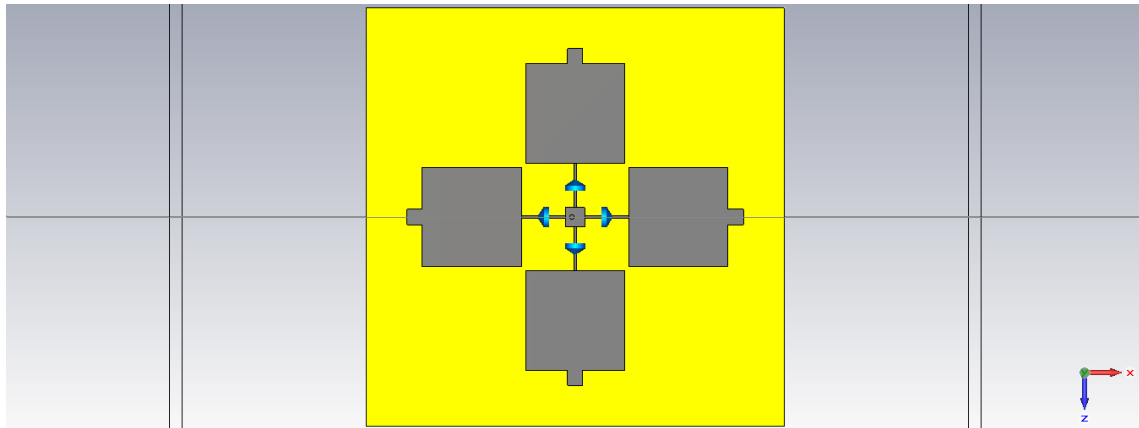


Fig. 2. SPA utilizando parches.

Como se aprecia en la Fig. 2, tenemos un parche central de dimensiones bastante menores que los que le rodean. Esto hace que, teniendo en cuenta que la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la longitud del parche, la primera resonancia venga marcada por los parches externos.

Por otro lado, tal y como podemos comprobar, cada uno de los parches externos tiene en uno de sus lados una tira adaptadora, ya que como se ha comentado anteriormente, el hecho de que uno de los parches comience a radiar hace que el resto empiece a su vez a radiar por acoplo. Utilizando teoría de microondas, sabemos que pasar de una condición de circuito abierto a una de cortocircuito es equivalente a movernos $\lambda_g/4$ a través de un camino eléctrico. A su vez, una condición de circuito abierto es equivalente a tener una impedancia infinita, haciendo que las corrientes electromagnéticas no puedan fluir. Este es el efecto que buscamos en los parches que no queremos que radien por acoplo. Por tanto, las tiras adaptadoras presentarán una condición de circuito abierto en aquellos parches que no estemos interesados que radien, y prácticamente no tendrán efecto en aquel parche que queramos que radie.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos con la antena de la Fig. 2.

	Directividad [dBi]	Eficiencia de radiación	Eficiencia de radiación [dB]	Eficiencia total	Eficiencia total [dB]	Ganancia [dB]
Dirección 1	8.797	0.9540	-0.2045	0.9423	-0.2583	8.593
Dirección 2	8.824	0.9086	-0.4164	0.8818	-0.5461	8.408
Dirección 3	8.802	0.9283	-0.3231	0.9066	-0.4259	8.479
Dirección 4	8.798	0.9254	-0.3368	0.9126	-0.3973	8.462

Tabla 3. Características de la SPA usando parches.

Como vemos en la Tabla 3, tenemos unos resultados bastante aceptables en cuanto a directividad, eficiencias y ganancia. Por otro lado, cada una de las filas de la Tabla 3 se corresponde con cada una de las 4 posibles direcciones a las que puede apuntar el haz.

Por su parte, la Tabla 4 muestra las dimensiones geométricas de la antena diseñada.

Elemento	Dimensiones geométricas [mm]
Longitud del parche central	5 ($\approx \lambda/25$)
Longitud de los parches externos	26.06 ($\approx \lambda/5$)
Longitud de la tira adaptadora	4 ($\approx \lambda/30$)
Longitud de la línea microstrip	5 ($\approx \lambda/25$)
Anchura de la línea microstrip	0.5 ($\approx \lambda/250$)
Anchura de gap entre las líneas microstrip	1.5
Grosor de los elementos metálicos	0.035
Grosor del sustrato	3.175
Longitud del sustrato (eje x)	109.62 ($\approx 9\lambda/10$)
Longitud del sustrato (eje z)	109.62 ($\approx 9\lambda/10$)

Tabla 4. Dimensiones de los elementos de la SPA usando parches.

En cuanto a los coeficientes de correlación, tendríamos que calcular sus valores para cada una de las posibles combinaciones entre dos diagramas de radiación, ya que en este caso los diagramas obtenidos no corresponden exactamente al mismo diagrama rotado, siendo cada uno de ellos ligeramente distinto. De este modo, como tenemos cuatro posibles direcciones, tendremos seis posibles combinaciones. Los resultados llevan a tener valores que oscilan entre 0.0190 y 0.3602 para los coeficientes de correlación. Esto hace que se cumpla completamente con la restricción de ser menores que 0.5, lo cual lleva a que la SPA diseñada sea implementable en una aplicación real.

Estudiando los resultados que alcanzaríamos para la capacidad de canal, en el caso de la rotating SPA son bastante altos y, teniendo en cuenta los valores del coeficiente de correlación, lo mismo ocurre para la antena adaptativa. La principal desventaja que presenta la implementación de una antena adaptativa utilizando un array de dos SPAs con respecto al caso de su implementación utilizando una SPA basada en dos monopolos activos es que, en este caso, los acoplos son bastante más altos, lo que puede llevar a tener peores resultados desde el punto de vista de las prestaciones de la antena.

Conclusiones y líneas futuras de investigación

El principal objetivo del proyecto ha sido el diseño de la SPA utilizando monopolos y utilizando parches, de tal modo que los resultados fueran óptimos desde el punto de vista de teoría de antenas y desde el punto de vista de la capacidad de canal alcanzada.

La idea seguida es que, si bien los sistemas MIMO incrementan enormemente la capacidad de canal, la necesidad de tener múltiples antenas con sus correspondientes cadenas de RF hace que el coste se incremente y el espacio necesario sea muy grande, lo que significa una desventaja clara para cualquier sistema de comunicaciones, particularmente en el diseño de dispositivos personales tales como teléfonos móviles. Por ello, este proyecto trata de simular el comportamiento que se tendría con múltiples antenas, pero empleando simplemente una o dos.

Las antenas estudiadas se han implementado empleando monopolos y empleando parches, obteniendo en ambos casos resultados bastante buenos.

Con estas antenas se puede diseñar tanto la rotating SPA como la antena adaptativa. En cuanto a la rotating SPA, dicha antena lleva a una expansión de la señal recibida en frecuencia, lo que hace que sólo pueda emplearse en el receptor. En cuanto a la antena adaptativa, puede emplearse tanto en el transmisor como en el receptor, pero es imprescindible la implementación de un algoritmo robusto que cambie los valores de las cargas activas para cambiar la orientación del haz buscando maximizar la capacidad del canal en cada instante temporal.

Por otro lado, los sistemas MIMO están llamados a ser una de las tecnologías empleadas en el futuro de las comunicaciones Wireless, lo que lo lleva a ser un campo muy amplio en investigación e innovación. De hecho, la próxima generación de telefonía móvil (4G) empleará dichos sistemas.

Estudiando las antenas que se presentan en este proyecto, distintas ampliaciones podrían llevarse a cabo. Entre ellas destaca la mejora del ancho de banda de las mismas, sobre todo en el caso de la SPA empleando parches.

Finalmente, una de las más prometedoras líneas futuras de investigación pasa por el empleo de diferentes esquemas de codificación y modulación tales como los STBC y MIMO-OFDM. Empleando dichas técnicas en un sistema que implementase la SPA, el tamaño del dispositivo se vería reducido, mientras que la capacidad de canal se vería incrementada notablemente, y con ella, la tasa de transmisión.